

DESEMPENHO DE UM FILTRO ANAERÓBIO ASCENDENTE DE FLUXO CONTÍNUO PREENCHIDO COM ESPUMA DE POLIURETANO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Paula Camargo Ferreira da Cruz (UEPG), E-mail: paullinh@hotmail.com
Priscila Santos Teixeira (UEPG), E-mail: priteijeira@hotmail.com
Laura Emília Carlos (UEPG), E-mail: Laura_zra@hotmail.com
Caroline Pereira (UEPG), E-mail: percaroline@hotmail.com
Maria Magdalena Ribas Doll (UEPG), E-mail: maria.ribas@gmail.com
Ana Cláudia Barana (UEPG), E-mail: anabarana@yahoo.com

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o tratamento de esgoto sintético por um reator anaeróbico de fluxo ascendente operado em regime contínuo. A inovação desta tecnologia refere-se ao uso de flocos de espuma de poliuretano como meio suporte para aderência da biomassa anaeróbia. O reator de bancada foi operado em temperatura ambiente e construído em tubos de PVC de diâmetro de 10 cm, altura de 45 cm com volume útil de 1,7 L. Os objetivos específicos da pesquisa foram: (i) avaliar a adaptação do reator anaeróbico inoculado com lodo de um reator que tratava efluente de uma cervejaria; (ii) avaliar a performance do reator frente à diminuição gradativa do tempo de detenção hidráulica; (iii) avaliar o desempenho do reator quanto aos parâmetros alcalinidade, acidez volátil, demanda química de oxigênio, pH e condutividade frente ao carregamento orgânico gradualmente crescente e redução do tempo de detenção hidráulica. O reator mostrou excelente adaptação sem alteração significativa de desempenho às variações de vazão e carga orgânica, promovidas pela diminuição do tempo de detenção hidráulica. A alcalinidade a bicarbonato do efluente tratado ficou entre 163 e 812 mg de HCO_3^-/L durante o período experimental, a acidez volátil total manteve-se entre 16 e 240 mg de HAc/L e o pH no intervalo de 5,12 a 8,38. A remoção de DQO média foi igual a 74,4 % em todo o período operacional.

Palavras-chave: esgoto, biodigestão anaeróbia, matéria orgânica, reator, inovação tecnológica.

PERFORMANCE OF AN UPFLOW ANAEROBIC FILTER UNDER CONTINUOUS FLOW FILLED WITH POLYURETHANE FOAM FOR DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT

Abstract: The objective of this research was evaluate the treatment of synthetic wastewater by an upflow anaerobic reactor operated in continuous regime. The innovation of this technology refers to the use of polyurethane foam flakes as a way for adhesion of anaerobic biomass. The bench reactor was operated at room temperature and built in PVC pipes of diameter 10 cm, height 45 cm with a volume of 1.7 L. The specific objectives of the research were: (i) evaluate the suitability of the upflow anaerobic reactor with sludge inoculated of a reactor that have treated the effluent from a brewery, (ii) evaluate the performance of the reactor opposite the gradual decrease of the hydraulic retention time, (iii) evaluate the performance of the reactor parameters as alkalinity, volatile acidity, chemical oxygen demand, pH and conductivity compared to organic loading gradually increasing and reducing the hydraulic retention time. The reactor showed excellent adaptation without significant change of performance to variations in flow and organic loading, promoted by decreasing the hydraulic retention time. The bicarbonate alkalinity of the treated effluent was between 163 and 812 mg of $\text{HCO}_3^- / \text{L}$ during the experiment, the total volatile acidity was maintained between 16 and 240 mg HAc / L and the pH in the range from 5.12 to 8, 38. The average COD removal was equal to 74.4% throughout the operational period.

Keywords: sewage, anaerobic digestion, organic matter, reactor, technological innovation.

1. INTRODUÇÃO

O termo esgoto refere-se ao resíduo produzido por uma comunidade que pode ser proveniente de três fontes diferentes: (a) de águas residuais domésticas, gerada a partir de banheiros e sanitários, e atividades como cozinhar, lavar, etc, (b) as águas residuais industriais, de

indústrias que utilizam o mesmo sistema de esgoto para os seus efluentes (tratado ou não), e (c) água da chuva, particularmente no caso de sistemas de esgotos construídos tanto para águas residuais e águas de tempestades (sistemas combinados) (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994 apud SEGHEZZO et al., 1998). No Brasil, as águas residuais domésticas são geralmente o componente principal do esgoto, e com frequência os termos são utilizados como sinônimos. Processos anaeróbios têm sido usados para o tratamento de resíduos domésticos e industriais (SEGHEZZO et al., 1998). Von Sperling (1996) discutiu sobre vários sistemas usados para tratamento de águas residuais em países em desenvolvimento como o Brasil, incluindo lagoas de estabilização, lodo ativado, filtros biológicos percoladores, sistemas anaeróbios e descarte de terra. Os processos anaeróbios estão adquirindo uma posição de destaque no mundo todo, especialmente em países de clima tropical, onde as condições ambientais são favoráveis para esse tipo de tratamento (CHERNICHARO, 1997 apud BEUX et al., 2007).

Segundo Bicalho (2007), para tratamento de águas residuárias mais diluídas, como os esgotos sanitários, os reatores anaeróbios de filme fixo, de leito estacionário e de leito expandido são os mais adequados, destacando-se os reatores anaeróbios de leito expandido e, especialmente, os filtros anaeróbios.

O material mais utilizado em filtros anaeróbios é a pedra brita, por ser um material sólido natural, de fácil acesso, baixo custo e por ser um material poroso, facilitando a fixação dos microrganismos, mas também é comumente utilizar outros materiais, como a escória britada, tufo de lava, peças cerâmicas ou de plástico, coque, hulha e ripas de madeira (geralmente usada em pequenas instalações). Logo após algumas semanas de funcionamento, os fragmentos se recobrem de bactérias, formando películas mucilaginosas (aderem ao meio suporte e não tem mais que 2 a 3 mm de espessura), principalmente, no interior das quais se processam os fenômenos de depuração, com isso, a atividade se verifica na superfície revestida dos fragmentos (IMHOFF e IMHOFF, 1996).

No Brasil, os materiais comumente usados como meio suporte em filtros anaeróbios são pedra brita, anéis de plásticos, elementos cerâmicos, módulos de plásticos, elementos de madeira e escória de alto forno de siderúrgicas, sendo a pedra brita geralmente usada nº 4 (50 mm – 76 mm) ou nº 5 (76 mm – 100 mm) com ótimos resultados (CHERNICHARO, 1997), cilindros de plásticos perfurados e esferas perfuradas ou gomos de bambu (GONÇALVES et al., 2001 apud CAMPOS et al., 2008).

Os filtros anaeróbios são reatores projetados para atingir uma elevada retenção de biomassa para uma operação eficiente e estável. Essa retenção é realizada pela imobilização de microrganismos no suporte do filtro por meio da produção de biofilme (SHOW e TAY, 1999).

Uma desvantagem de tratar biologicamente efluentes, principalmente, com microrganismos anaeróbios é que são sensíveis ao regime de alimentação e a aumentos de vazão repentinos.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente e contínuo preenchido com espumas de poliuretano como uma tecnologia inovadora para o tratamento de esgoto com diminuição do tempo de retenção hidráulica (TRH).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O filtro anaeróbio de escala de bancada construído em cloreto de polivinila (PVC) tinha 1,7 L e 2,6 L de volume útil e total, respectivamente. O reator consistiu de um tubo de diâmetro externo de 10 cm e altura de 45 cm. Na parte superior do reator, o espaço livre de 4,1 cm foi designado para armazenamento do biogás. O desenho esquemático filtro experimental está apresentado na Figura 1. O reator foi operado em temperatura ambiente, que se manteve entre $20,6 \pm 4$ °C. Como leito fixo para a imobilização da biomassa foram usados flocos de espumas de poliuretano com tamanhos irregulares, porém padronizados. O tamanho das espumas foi padronizado usando peneiras de malhas 12,7 mm e 26,0 mm, com densidade aparente de 23 kg/m³ e 95 % de porosidade. Dentro do reator foram colocadas 52 g de espumas e em seguida, o volume útil foi medido com a adição de um volume conhecido de água. O biogás produzido e alocado na parte superior do reator poderia ser conduzido por uma saída de gás conectada a um gasômetro para o armazenamento e medição diária. O gasômetro era formado por dois recipientes fechados (fotografia da Figura 1). Um deles (o primeiro) continha água e dois tubos internos (de diâmetro de 0,5 cm). Um dos tubos servia para receber o gás do reator que empurrava a água pelo outro tubo para o segundo recipiente, para a coleta e medição do volume de água movido pelo biogás. Então, o volume de biogás produzido (V₀) foi corrigido para condições normais de pressão e temperatura (CNTP), conforme a Equação 1. A correção do volume de gás foi realizada considerando a sua umidade e temperatura local.

$$\frac{P_0 * V_0}{T_0} = \frac{P_1 * V_1}{T_1} * F$$

Equação 1

Onde:

P₀ – Pressão padronizada (760 mmHg)

T₀ – Temperatura padronizada (273 K)

F – Fator de correção para umidade do biogás com relação a temperaturas abaixo dos 30 °C

T₁ – Temperatura média observada (K)

V₁ – Volume de água deslocada pelo biogás e medida (L)

P₁ – Pressão local de Ponta Grossa – PR (mmHg)

V₀ – Volume produzido

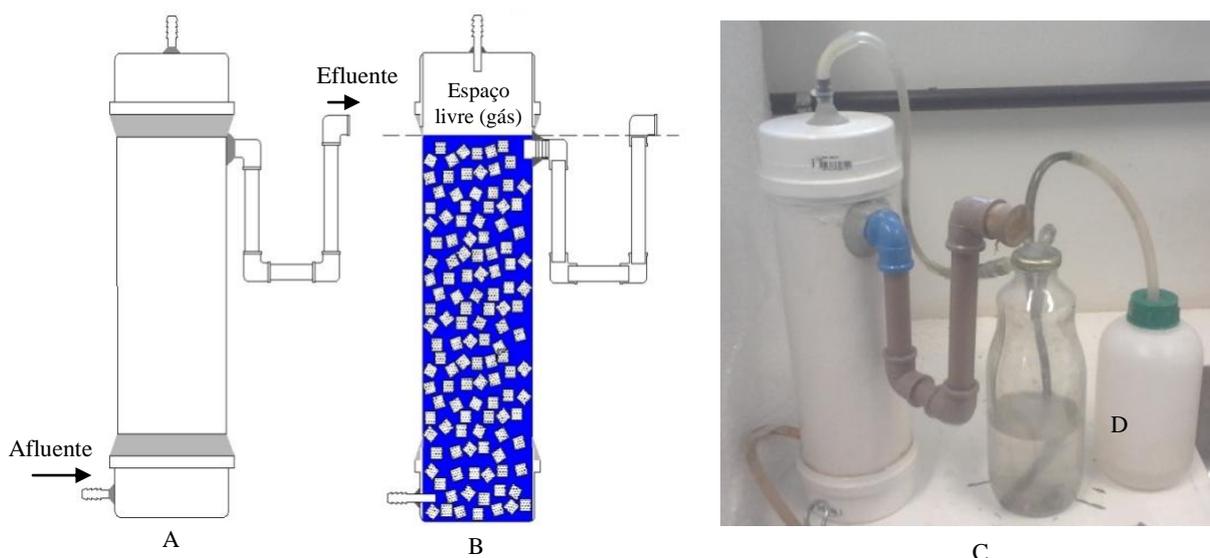


Figura 1 – Esquema do filtro anaeróbio experimental de escala de bancada para tratamento de esgoto sintético: A – Vista externa, B – Vista interna, C – Fotografia do sistema experimental e D – Gasômetro.

As espumas foram inoculadas com 0,6 L de lodo anaeróbio granular mesófilo, obtido de um reator metanogênico que tratava efluente de uma cervejaria. As operações de enchimento e descarga foram realizadas por uma bomba peristáltica comandada por um temporizador. A água residual consistia em um esgoto sintético com 500 mg de demanda química de oxigênio (DQO) por litro que era preparada no momento da alimentação do reator ou armazenada a aproximadamente 5 °C para evitar decomposição antecipada. Preliminarmente, o pH do substrato foi monitorado por quatro dias para se verificar a decomposição em temperatura ambiente.

A composição do esgoto sintético está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do esgoto sintético com 500 mg DQO/L.

Composição	Quantidade para 1 L
Sacarose	35,0 mg
Amido	114,0 mg
Extrato de carne	208,0 mg
Óleo de soja	51,0 mg
NaCl	250,0 mg
MgCl ₂ .6H ₂ O	7,0 mg
CaCl ₂ .2H ₂ O	4,5 mg
NaHCO ₃	200,0 mg
Detergente	3 gotas

Fonte: Torres (1992).

A inoculação foi feita para aumentar os microrganismos metanogênicos e acelerar o processo de adaptação e partida do reator. Na fase de adaptação do reator, que durou 30 dias, somente o pH do sistema foi monitorado. Depois disso, as fases seguintes da adaptação foram divididas

em quatro etapas com reduções gradativas dos TDH. As condições operacionais do funcionamento do reator são apresentadas na Tabela 2.

Quando não eram observadas grandes variações na eficiência de remoção de DQO e também quando era observado pelo menos 60% de remoção de DQO, em cerca de três amostras consecutivas do efluente com relação ao afluente, o sistema era considerado em equilíbrio. Portanto, o tempo de retenção hidráulica (TRH) era diminuído.

Tabela 2 – Condições operacionais nas etapas experimentais do filtro anaeróbio tratando esgoto sintético.

Etapas	Duração (d)	Vazão (L/d)	Concentração orgânica (g DQO/L)	Carga orgânica* (g DQO/d)	TRH (d)	TCO** (g DQO/L.d)
1	32	0,5	0,5	0,25	3,48	0,125
2	97	0,7	0,5	0,35	2,49	0,167
3	45	1,0	0,5	0,50	1,74	0,250
4	53	2,0	0,5	1,00	0,87	0,500

*Carga orgânica correspondente a concentração de DQO multiplicando a alimentação; **TCO – Taxa de carga orgânica correspondente a relação entre o DQO e o TRH.

O desempenho do filtro anaeróbio foi avaliado por meio de monitoramento uma vez por semana do afluente e efluente dos parâmetros: DQO, sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), condutividade elétrica e pH, determinados de acordo com APHA (1995) - *Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater*; alcalinidade bicarbonato (AB) de acordo com DiLallo e Albertson (1961), modificado por Ripley et al. (1986) e ácidos voláteis totais (AVT) foi avaliado de acordo com DiLallo e Albertson (1961).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, o ensaio rápido de 4 dias sobre a degradação do substrato sintético pelo monitoramento do pH indicou alta biodegradação do esgoto sintético e a necessidade de armazenamento em ambiente refrigerado, abaixo de 5°C, para manutenção das características do esgoto antes de entrar no reator. Os valores para pH no primeiro, segundo, terceiro e quarto dia de incubação em temperatura ambiente foram 8,16; 6,77; 6,10 e 6,00, respectivamente.

Já os valores obtidos durante os primeiros 30 dias da fase de adaptação dos microrganismos estão na Tabela 3.

Os valores do pH do efluente correspondente à saída do reator acima de 7,0 indicaram que no sistema estava funcionando ambas as fases acidogênica com produção de ácidos orgânicos seguida da fase metanogênica com consumo desses ácidos e possível conversão a biogás. Portanto, o reator poderia ser considerado como adaptado às condições operacionais, com biomassa anaeróbia desenvolvida e apto a ser submetido aos crescentes aumentos de carga

orgânica e hidráulica, o que corresponde a uma vazão maior de esgoto em menor tempo de detenção hidráulica.

Tabela 3 – Medições de pH durante a fase de adaptação.

Tempo de operação (d)	pH _{afluente}	pH _{efluente}	Tempo de operação (d)	pH _{afluente}	pH _{efluente}
1	7,46	6,48	16	7,55	6,93
2	7,46	6,81	17	8,00	7,10
3	7,46	6,94	18	8,00	7,52
4	8,20	6,75	19	7,84	6,68
5	8,20	7,05	20	7,84	7,30
6	7,84	7,28	21	7,85	7,10
7	7,84	7,33	22	7,85	7,58
8	7,80	6,95	23	7,72	7,21
9	7,80	7,08	24	7,72	7,39
10	7,80	7,52	25	7,72	6,83
11	7,84	7,16	26	7,72	7,20
12	7,84	7,53	27	8,12	7,52
13	7,84	7,79	28	8,12	6,98
14	7,55	7,26	29	8,12	7,02
15	7,55	7,35	30	8,12	7,07

Os valores médios obtidos para as variáveis monitoradas em cada fase experimental estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios e desvio padrão das variáveis monitoradas do afluente e do efluente do reator durante o período experimental.

Etapa	pH _{afluente}	pH _{efluente}	CE _{efluente} μS/cm	AB _{afluente} (mg HCO ₃ ⁻ /L)	AB _{efluente}	AVT _{afluente} (mg HAc/L)	AVT _{efluente}
1	7,2 ± 0,3	7,8 ± 0,2	768 ± 181	386 ± 44	717 ± 41	63 ± 17	42 ± 13
2	7,3 ± 0,4	7,8 ± 0,6	914 ± 145	398 ± 107	590 ± 116	61 ± 15	43 ± 5
3	7,1 ± 0,4	7,7 ± 0,4	845 ± 141	347 ± 55	758 ± 60	49 ± 18	24 ± 7
4	6,8 ± 0,5	7,8 ± 0,6	643 ± 158	460 ± 131	539 ± 179	45 ± 28	102 ± 66

Observa-se que tanto o pH do afluente como do efluente apresentaram valores acima de 7,00 sem necessidade de suplementação de substâncias alcalinas, além das existentes no esgoto sanitário sintético. O pH ótimo para as arqueias metanogênicas é entre 6,8 e 7,4 (Speece, 1996), mas vários autores relataram que o processo de metanogênese não foi comprometida com um pH superior a 7,4. Esse fato também foi observado durante todas as fases

experimentais, o pH efluente foi de aproximadamente 7,8. O perfil do monitoramento do pH em valores absolutos está presente na Figura 2.

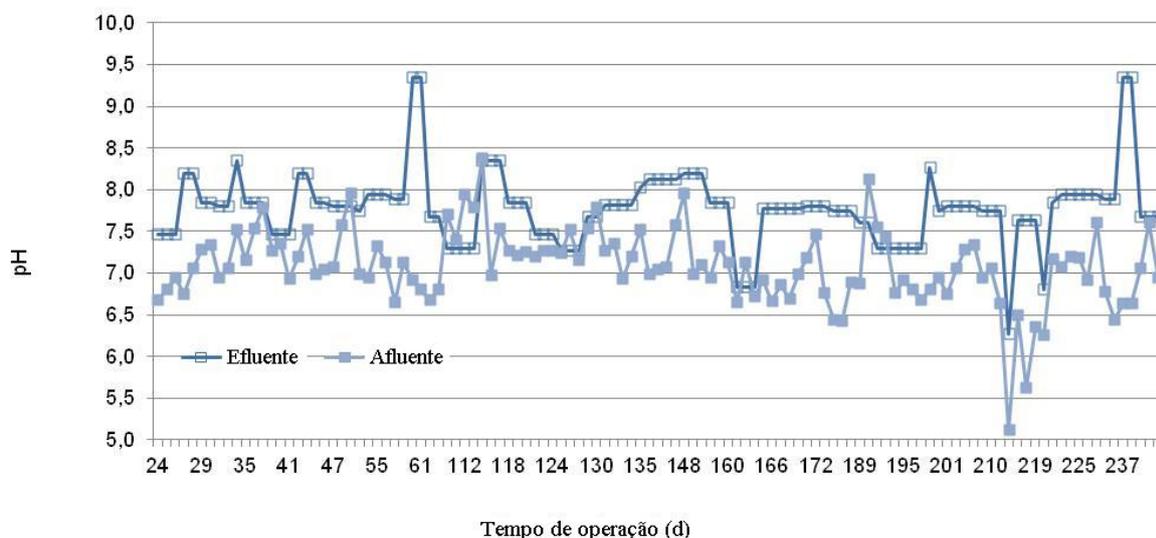


Figura 2 – Monitoramento do pH do filtro anaeróbico tratando esgoto sanitário sintético.

Conforme dados médios apresentados na Tabela 3, observa-se que o efluente metanogênico apresentou produção de alcalinidade bicarbonato (AB) e consumo de ácidos voláteis, com exceção da quarta etapa em que foi observado cerca de 102 mg HAC/L remanescente no efluente.

A maior produção de alcalinidade bicarbonato foi observada na terceira etapa com uma média de 758 mg HCO_3^-/L . Esse fato indica que a biomassa anaeróbia estava adaptada, respondendo positivamente ao aumento gradual da carga orgânica e que o TDH de 1,74 dia estava sendo suficiente para a atividade dos microrganismos. O TRH ideal para o esgoto sanitário é cerca de 8 horas para outras configurações como reatores UASB. Nesta etapa, a menor quantidade de AVT também foi observada (24 mg HAC/L), indicando consumo de ácidos com provável produção de metano no biogás. O consumo de ácidos voláteis e a produção de alcalinidade bicarbonato mostrou que os microrganismos adaptaram-se ao esgoto sintético, ao filtro anaeróbico e às condições operacionais impostas.

Na quarta etapa, houve uma queda de eficiência. Provavelmente, o aumento de matéria orgânica e a redução do TRH na última etapa representou um choque de carga para os microrganismos metanogênicos resultando no aumento dos ácidos voláteis totais para 102 mg HAC/L e a redução da alcalinidade bicarbonato para 539 mg HCO_3^-/L .

Os valores de DQO e de remoção de DQO obtidos em todas as etapas do experimento estão apresentados na Figura 3. A remoção de DQO média foi igual a 74,38 % em todo o período de operação. Apesar dos excelentes resultados médios de remoção de DQO, produção de alcalinidade, consumo de acidez e valores de pH elevados, certa instabilidade nos valores de remoção de DQO foi observada em todas as etapas.

Provavelmente, o tempo de operação em cada etapa não foi suficiente para um aumento mais significativo de remoção de DQO. Quando o TRH era modificado, uma redução na eficiência do sistema era observada. Isto pode ser claramente visualizado na quarta etapa, mas depois de um tempo funcionando na nova condição operacional, o sistema se adaptava e a maior remoção de DQO era restabelecida.

Nas terceira e quarta etapas, o reator mostrou uma produção de 0,63 L biogás/g SV_{destruído} e um volume de 114,62 mL/d, um valor muito próximo do volume teórico de biogás que deveria gerar de 126,92 mL/d. Isto mostra que o reator estava bem adaptado, em completa operação, consumindo a matéria orgânica do esgoto e transformando-a em biogás.

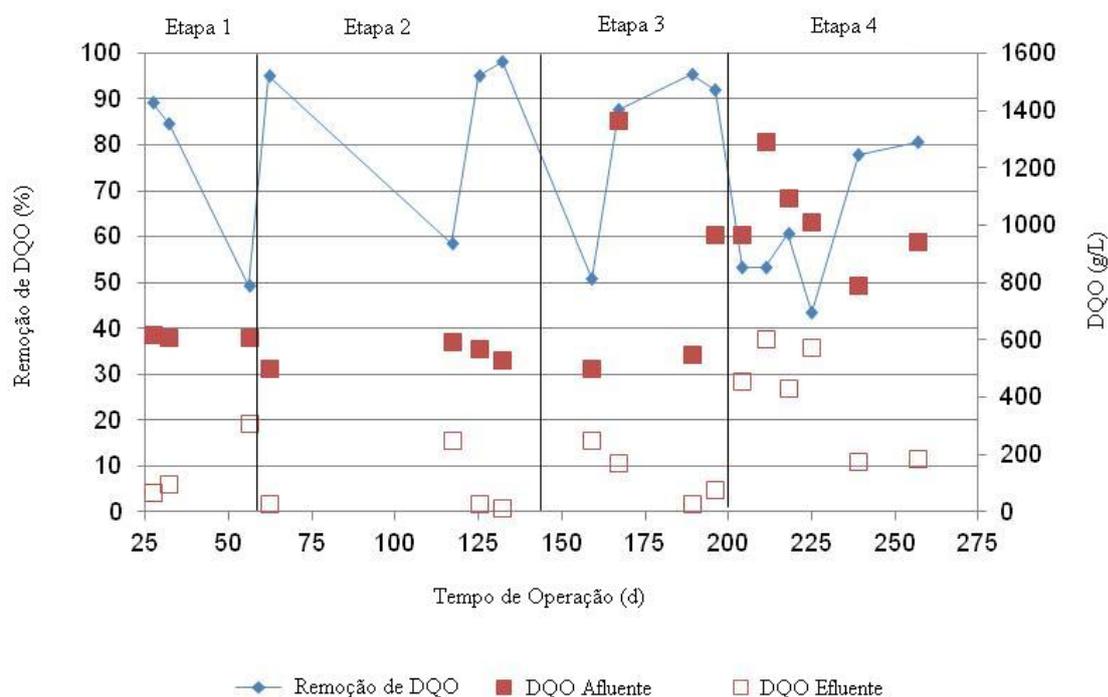


Figura 3 – Monitoramento de DQO e remoção de DQO em todas as etapas experimentais do tratamento anaeróbico de esgoto sintético.

Quanto aos resultados de sólidos, apenas uma amostragem nas fases 1, 3 e 4 foi realizada com réplica a fim de verificar uma possível perda de biomassa de dentro do reator ao longo do período experimental (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultados de sólidos totais e de sólidos voláteis totais.

Amostra da Fase	Sólidos Totais		Sólidos Voláteis Totais	
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	1090	920	650	590
3	1000	840	690	560
4	1030	880	675	570

Observa-se na Tabela 5 que não houve perda de sólidos totais ou voláteis totais significativa no efluente das três amostragens. Isso demonstra que o meio suporte usado no reator, flocos de espuma de poliuretano, atuaram como excelente meio de adesão e manutenção da biomassa anaeróbia dentro do sistema.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na operação do filtro anaeróbio preenchido com flocos de espuma de poliuretano tratando esgoto sanitário sintético, submetido ao aumento gradual de carga orgânica e a redução de TRH em temperatura ambiente, permite concluir que:

- A adaptação foi rápida em torno de 30 dias e a biomassa anaeróbia não apresentou redução abrupta na eficiência e nem acumulação de grande quantidade de ácidos voláteis;
- O tratamento de esgoto doméstico sintético foi possível sob temperatura ambiente e fluxo contínuo indicado pelo monitoramento de DQO, AB, AVT, pH, condutividade elétrica e sólidos;
- Foi observada instabilidade operacional com as mudanças do TRH no início de cada etapa experimental;
- Como o reator não atingiu a carga orgânica volumétrica máxima nem no TRH ideal para o esgoto sanitário (8 horas), recomenda-se que o experimento seja conduzido por maior tempo para otimização do TRH e da carga orgânica;
- Com base nos resultados apresentados, as condições da terceira etapa promoveram melhores desempenhos com relação a produção de alcalinidade bicarbonato, consumo de AVT e média de 81% de remoção de DQO.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq, a Fundação Araucária e a Universidade Estadual de Ponta Grossa pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

APHA – American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: APHA, 19 ed., 1995.

BEUX, S., NUNES, E., BARANA, A.C. (2007). Effect of temperature on two-phase anaerobic reactors treating slaughterhouse wastewater. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 50 (6), 1061-1072.

DILALLO, R., ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direct titration. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1961. V.33, n. 4, p.356.

RIPLEY, L.E., BOYLE, W.C., CONVERSE, J.C. (1986). Improved alkalimetric monitoring anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal of Water Pollution Control Federation* 58, 406-411.

SEGHEZZO, L., Zeeman, G., van Lier, J.B., Hamelers, H. V. M., Lettinga, G. (1998). A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology* 65, 175-190.

SPEECE, R.E. (1996) *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. Archae Press, Nashville, 394.

TORRES, P. (1992). Desempenho de um Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) de Bancada no Tratamento de Substrato Sintético Simulando Esgotos Sanitários. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VON SPERLING, M. (1996). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, 33(3), 59-72.

IMHOFF, K., IMHOFF, K. R. *Manual de tratamento de águas residuárias*. 26 ed. (tradução). São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1996. 301 p.

SHOW, K. Y.; TAY, J. H. Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters. *Water Research*, v.33, n.6, p.1471-1481, 1999.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997, v. 5, 246 p.

BICALHO, J. R. S. Modelagem computacional de um reator anaeróbio fabricado em polietileno de alta densidade rotomoldado. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Programa de Pós-Graduação do Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio Janeiro, Nova Friburgo, 2007.

CAMPOS, L. E. F., PETTER, C. O., KAUTZMANN, R. M. Filtro anaeróbio: uso de resíduos de construção como material suporte. *Revista de Ciências Ambientais, Canoas*, v. 2, n. 1, p. 5-13, 2008.

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. *Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente*, Eppgraf, Campina Grande, 1994. 240 p.

GONÇALVES, R. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDRADE NETO, C. O.; ALEM SOBRINHO, P.; KATO, M. T.; COSTA, R. H. R.; AISSE, M. M.; ZAIAT, M. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Reatores com Biofilme. p.171-278. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coord.) *Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2001. 544p.